

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 30 日現在

機関番号：34416
 研究種目：基盤研究(C)
 研究期間：2010～2012
 課題番号：22510189
 研究課題名（和文）
 土石流発生時における危険区域予測システムの開発に関する研究
 研究課題名（英文）
 Research on Development of Prediction System of Dangerous Areas for Debris Flows
 研究代表者
 川口 寿裕（ KAWAGUCHI TOSHIHIRO ）
 関西大学・社会安全学部・准教授
 研究者番号：80234045

研究成果の概要（和文）：

土石流は固体（岩石）と液体（水）が相互に作用しながら、自由界面を持って流れる固液混相流と呼ばれる流れであり、その運動は非常に複雑であるため予測が困難である。本研究では、土石流のように自由界面を伴う固液混相流を対象として、その流れを予測するための数値シミュレーション手法（DEM-MPS カップリング法）の開発を行った。本手法を発展させることで、土石流発生時の危険区域予測システム開発に繋がることが期待される。

研究成果の概要（英文）：

A debris flow is one of the solid-liquid multiphase flows, in which the solid (soil) and the liquid (water) interacting each other move with a free surface. The behavior of the debris flow is too complex to predict. In the present study, a numerical scheme is developed to predict the solid-liquid flow with the free surface. In this scheme the DEM (Discrete Element Method) is coupled with MPS (Moving Particle Semi-implicit). The present scheme can be extended to a prediction system of dangerous region at the occurrence of the debris flow.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	500,000	150,000	650,000
2011 年度	2,200,000	660,000	2,860,000
2012 年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：流体工学

科研費の分科・細目：社会・安全システム科学、自然災害科学

キーワード：土石流、数値シミュレーション、混相流

1. 研究開始当初の背景

(1) 日本は梅雨や台風等により、短時間に集中的な大雨が降ることがたびたびあり、特に近年はゲリラ豪雨と呼ばれる現象が顕著になってきている。これに伴い、山間部で土石流が発生し、土石流によって流された土砂が下流の集落地にも大きな被害をもたらす。土

石流は固体（岩石）と液体（水）が相互に作用しながら、自由界面をもって流れる固液混相流である。その挙動は複雑であり、土石流の流動および危険区域を予測するシステムは開発されていない。

(2) 離散要素法（DEM: Discrete Element

Method) により、岩石や粉粒体の挙動を精度良く模擬できることが確認されている。一方、自由界面を持つ液体流れの解析には、MPS (Moving Particle Semi-implicit method) 等の粒子法が適していることが報告されるようになってきた。DEM と MPS をカップリングすることで、自由界面を持つ固液混相流の数値解析が可能となり、土石流の流動を模擬し、危険区域を予測できるシステムの開発が可能であると考えた。

2. 研究の目的

(1) 自由界面を伴う固液二相流の流動を模擬するための数値解析手法を開発し、土石流の流動および危険区域を予測するシステム開発に繋げる。

(2) 透明容器を用いた実験装置を作製し、液中の粒子挙動を PTV(Particle Tracking Velocimetry)解析する。条件を合わせた数値シミュレーション結果との比較を通して、数値解析モデルの検証および改良を行う。

3. 研究の方法

(1) DEM と有限体積法をカップリングさせた、固気二相流の数値解析用計算コードはすでに本研究者が有している。通常有限体積法では自由界面の取扱いが困難であるため、この部分を粒子法の1つである MPS に置き換える。計算コードを並列化し、クラスタ計算機を利用することで、計算の高速化を図る。

(2) 計算結果の検証を行うため、透明アクリル製の実験装置を作製し、液中固体粒子挙動を高速度カメラで撮影し、PTV 解析する。数値計算結果との比較を通じて計算モデルの改良を行う。

4. 研究成果

(1) 本研究では流体計算において、局所相平均量に基づいた基礎式を解く。それゆえ一般的な MPS 法において各 MPS 粒子が保持している物理量である速度、位置、圧力の情報に加え、各 MPS 粒子に対して空隙率 ε を定義する必要がある。また、DEM 粒子に働く流体力を計算する際にも、粒子・流体間相互作用が働く範囲を規定する必要がある。そこで本研究では図 1 に示すように、それぞれ MPS 粒子および DEM 粒子を中心とした球形の影響領域を導入した。ここで、 r_{cut} は影響領域の半径である。各 MPS 粒子の空隙率は、図 1(a) の影響領域内に含まれる DEM 粒子の体積から計算する。また、DEM 粒子に作用する流体力を計算する際には、図 1(b) の影響領域内に含まれる MPS 粒子の情報のみを用いる。本研究では、簡単のため、空隙率計算時と DEM 粒子に作用する流体力を計算するとき

とで、影響領域の半径 r_{cut} として同じ値を用いた。

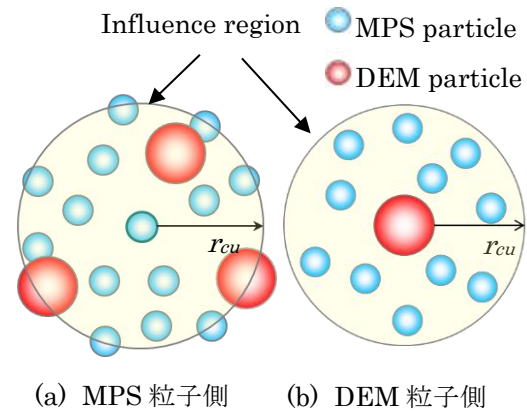


図 1 影響領域

(2) 本研究における DEM 粒子運動の基礎式は、個々の DEM 粒子に対する並進および回転の運動方程式であり、以下の式で表される。本研究では粒子に働く力として、接触力、流体力および重力を考慮した。

$$m\ddot{\mathbf{x}} = \sum_j \mathbf{f}_{Cij} + \mathbf{f}_{Di} + m\mathbf{g}$$

$$I_i \dot{\boldsymbol{\omega}}_i = \sum_j \mathbf{M}_{ij}$$

ここで、 m は粒子の質量、 $\ddot{\mathbf{x}}$ は粒子 i の加速度、 \mathbf{g} は重力加速度である。 \mathbf{f}_{Cij} は粒子 i が粒子 (または壁面) j から受ける接触力であり、 \mathbf{f}_{Di} は流体力である。また、 $\boldsymbol{\omega}$ は回転角速度、 \mathbf{M}_{ij} は粒子 i が粒子 (または壁面) j との接触により受けるトルクを表す。 I_i は粒子 i の慣性モーメントである。

粒子間および粒子-壁面間に働く接触力について、法線方向の力は弾性変形およびそれに伴う弾性反発力を表すバネとエネルギー減衰を表すダッシュポットで表現される。接線方向の力は、変形量が小さいうちは法線方向と同様にバネとダッシュポットによって表現し、変形量が大きくなり滑りの条件を満たす場合は摩擦スライダを用いて表現される。粒子 i に作用する流体力は DEM-CFD カップリング手法で一般に行われているのと同様に、圧力勾配による力と、次式に示す力 \mathbf{f}_{Dli} の和として与えた。

$$\mathbf{f}_{Dli} = \frac{\beta V_p}{1 - \varepsilon} (\bar{\mathbf{u}}_f - \mathbf{u}_{pi})$$

ここで、 V_p は DEM 粒子 1 個の体積、 $\bar{\mathbf{u}}_f$ は図 1(b) に示した影響領域内における MPS 粒子速度の平均、 \mathbf{u}_{pi} は DEM 粒子 i の速度である。 β は流体抵抗係数であり、以下の相関式に示すように空隙率の小さな領域に対するもの

は充填層に対する Ergun の式、空隙率の大きな領域に対するものは Wen と Yu の式で与えた。また、流体抵抗係数および空隙率は、図 1(b) に示した影響領域内における各 MPS 粒子の空隙率および流体抵抗係数を平均した値で与えた。

$$\beta = \begin{cases} \frac{\mu_f(1-\varepsilon)}{d_p^2 \varepsilon} [150(1-\varepsilon + 1.75\text{Re})] & (\varepsilon \leq 0.8) \\ \frac{3}{4} C_D \frac{\mu_f(1-\varepsilon)}{d_p^2} \varepsilon^{-2.7} \text{Re} & (\varepsilon > 0.8) \end{cases}$$

ここで、 μ_f は流体の粘性係数、 d_p は DEM 粒子の直径である。 C_D は単一球に対する抵抗係数である。

次に、圧力勾配による力について考える。圧力勾配による力についても図 1(b) の影響領域内に含まれる MPS 粒子の持つ圧力勾配の平均値で与えた。体積 V_p の粒子に働く力 f_{D2i} は次式で与えられる。

$$f_{D2i} = -\frac{1}{n} \sum_j \nabla p_j V_p$$

ここで、 n は影響領域内に含まれる MPS 粒子の個数である。

(3) MPS 法はラグランジュ法であるので、離散化の際に格子を設定する必要はない。また界面となる位置には常に粒子が存在しているため、明示的に界面を追跡する必要がないという特徴がある。MPS 法では、勾配、発散、ラプラシアンといった微分演算子に対してそれぞれ粒子間相互作用モデルを用意し、基礎式を離散化する。本研究では Anderson と Jackson によって導かれた局所相平均量に対する連続の式および運動方程式を流体運動の基礎式として用いた。

$$\frac{\partial(\varphi_f)}{\partial t} + \nabla \cdot (\varepsilon \rho_f \mathbf{u}_f) = 0$$

$$\frac{D(\varepsilon \mathbf{u}_f)}{Dt} = -\frac{\varepsilon}{\rho_f} \nabla p + \varepsilon \nu \nabla^2 \mathbf{u}_f + \varepsilon \mathbf{g} + \frac{1}{\rho_f V_f} \mathbf{f}_{pf}$$

ここで、 ν は動粘度、 V_f は MPS 粒子の体積である。また、運動方程式の右辺第 4 項は、粒子-流体間の相互作用を表す項で、流体力 f_{D1i} の影響領域内での総和を影響領域内に存在する MPS 粒子に分配することになる。本計算では単純に影響領域内に存在する MPS 粒子の数 n で除することにより、次式で与えた。

$$\mathbf{f}_{pf} = -\frac{1}{n} \sum_i \mathbf{f}_{D1i}$$

影響領域内に壁面を含む場合には、影響半径 r_{cut} をもつ球の体積 V_c と、 V_c から壁の部分

除いた体積 V の比 $\alpha = V/V_c$ を用いて、以下のように補正した。

$$\mathbf{f}_{pf} = -\frac{\alpha}{n} \sum_i \mathbf{f}_{D1i}$$

(4) 図 2 に実験装置全体の構成および実験容器の詳細を示す。実験装置全体の構成として、容器正面に高速度カメラ (Photron 製、FASTCAM ultima 1024) を、その後方に分散板およびハロゲンランプを設置している。実験容器は $70\text{mm} \times 20\text{mm} \times 140\text{mm}$ の矩形断面を持ち、観察面 (前後壁) は傷のつきにくいガラスを用い、それ以外の壁はアクリルで構成した。本容器下部から水面までの高さ $h_w = 35\text{mm}$ とした。実験で使用した粒子は、平均直径 3.0mm の単分散球形アルミニウム粒子である。容器の端から 20mm の位置まで粒子をランダムに配置し、厚さ 2mm の薄いアクリル板で仕切っておく。初期粒子層高はおよそ 30mm であった。次に、その仕切り板を弾性力を用いて上方に素早く引き抜き、粒子群の挙動をハイスピードカメラで撮影した。画像の解像度は $512 \times 512\text{ pixel}$ 、フレーム速度は 1000 fps である。本実験では矩形容器内の粒子群に対して PTV 計測を行った。

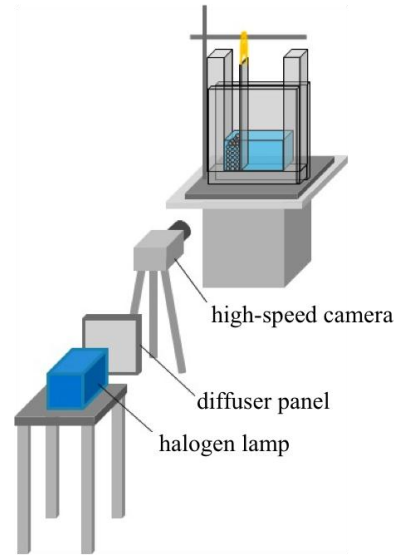


図 2 実験装置

(5) まず、DEM が本体系の現象を正確に表現できるかどうかを確認するため、MPS 法による液体計算を行わない数値シミュレーションを行い、水を入れずの実験結果と比較した。これを「気中」と呼ぶことにする。図 3 は仕切り板を取り去ってから 0.04 s 経過後のスナップショットである。上が計算結果、下が実験結果を表す。計算結果における粒子の色は x 方向速度の大きさを表している。実験結果

において、各粒子の速度を PTV で計測し、図中に矢印で示している。

図 4 は同様に、仕切り板を取り去ってから 0.16 s 経過後のスナップショットである。計算では粒子が右端壁に到達しているのに対して、実験ではまだ到達していない。この計算と実験における結果の違いについて考察する。

計算において、仕切り板は瞬間的にその存在を除去することができる。これに対して、実験では、仕切り板は弾性力によって引き上げられるため、完全にその存在がなくなるまでに有限の時間がかかる。さらに、仕切り板が上方に引き上げられる際、摩擦により、粒子群も少し上方に持ち上げられることになる。このため、実験では計算に比べて粒子群が崩れ始めるのがやや遅れることになる。このことは、図 3 における粒子群のスナップショットを比較すれば明らかである。計算においてはすでに粒子群が崩れ始めているのに対して、実験ではまだほとんど粒子群の崩壊が始まっていない。このことにより、計算では実験に比べて粒子が早く右端壁に到達したものと考えられる。

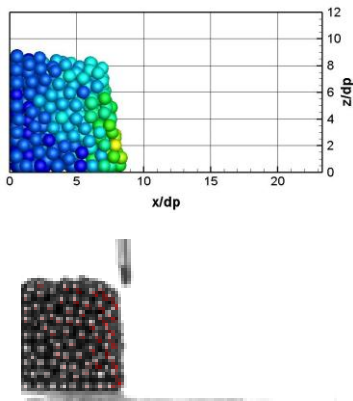


図 3 0.04 秒後のスナップショット (気中)

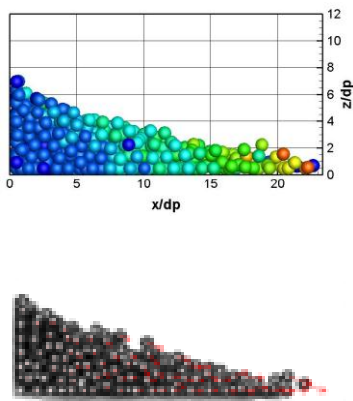


図 4 0.16 秒後のスナップショット (気中)

(6) MPS 法による液体運動計算を組み込んだ計算を行い、液中粒子群挙動について実験と比較した。気中では $t=0.16$ s 程度で粒子が右端壁に到達していたが、液中では 0.6 s 程度かかっていることが分かる。このことから、定性的には液の影響が組み込まれていることが確認できる。

図 5 に仕切り板を取り去ってから 0.2s 後のスナップショットを示す。図 3 と同様に、上が計算結果、下が実験結果を表す。また、図 6 に仕切り板を取り去ってから 0.6s 後のスナップショットを示す。気中と同様、計算に比べて実験では粒子が右端壁に到達するまでに少し長い時間を要している。この原因については、気中と同様、実験において仕切り板が上方に引き上げられることの影響であると考えられる。仕切り板の取り去り方の違いによる差異があるものの、DEM-MPS カップリング法により、液中粒子群挙動をよく表せることが確認された。

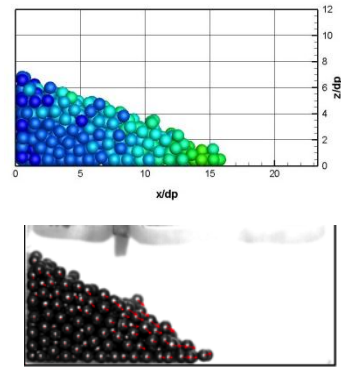


図 5 0.2 秒後のスナップショット (液中)

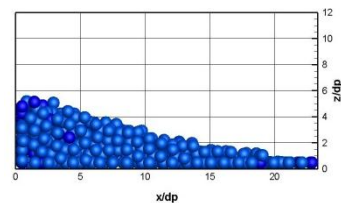


図 6 0.6 秒後のスナップショット (液中)

(7) 崩壊していく粒子群のうち、先頭の粒子の重心位置を追跡し、計算と実験とで定量的に比較を行った。結果を図 7 に示す。ただし、縦軸は先頭粒子の重心位置を粒子直径で除した値となっている。前述の通り、計算では実験に比べて、先頭粒子が右端壁に到達するまでの時間が短い。この理由として、実験において仕切り板を上方に引き上げる際に、摩擦により粒子群も上方に引き上げられるこ

との影響を挙げた。それ以外に、計算では粒子は完全な球を想定しており、転がり抵抗も考慮していない。したがって、計算で用いる粒子は実際よりも転がりやすい可能性がある。このことも実験よりも計算の方が短時間で粒子が右端壁に到達する理由の1つとして考えられる。ただし、全体的には計算と実験はよく一致しており、DEMおよびDEM-MPS計算が気中および液中の粒子群崩壊挙動を十分な精度で表現できることが確認できた。

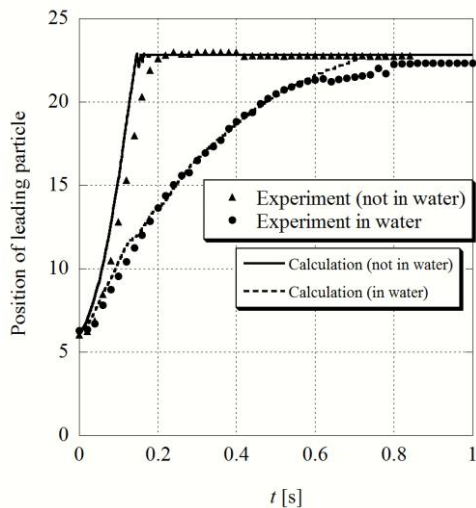


図7 先頭粒子位置の比較

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

- ① 川口寿裕、萩原健一郎、乾真規、辻拓也、田中敏嗣、液中固体粒子挙動の DEM-MPS 解析および PTV 計測、日本機械学会論文集 (B 編)、査読有、Vol. 78、No. 786、2012、pp. 276-290
- ② 川口寿裕、藪野真大、辻裕、粒子振動層

内対流挙動の MRI 計測、日本機械学会論文集 (B 編)、査読有、Vol. 77、No. 784、2011、pp. 227-2235

[学会発表] (計 4 件)

- ① 長谷遼太、田中敏嗣、川口寿裕、辻拓也、藪野公彰、メゾスコピック MPS-DEM カップリングモデルによる固液二相流の数値解析、混相流シンポジウム 2013、2013 年 8 月 9 日、信州大学
- ② 川口寿裕、萩原健一郎、乾真規、辻拓也、田中敏嗣、DEM-MPS カップリング手法による液中粒子群挙動解析、第 17 回流動化・粒子プロセッシングシンポジウム、2011 年 11 月 21 日、名古屋大学
- ③ 川口寿裕、萩原健一郎、乾真規、辻拓也、田中敏嗣、液中粒子群挙動の DEM-MPS 解析および PTV 計測、日本混相流学会年会講演会 2011、2011 年 8 月 6 日、京都工芸繊維大学
- ④ 萩原健一郎、川口寿裕、辻拓也、田中敏嗣、自由界面を伴う固液二相流解析のための DEM-MPS カップリングモデルの構築、日本機械学会関西支部第 86 期定時総会講演会、2011 年 3 月 20 日、京都工芸繊維大学

[図書] (計 1 件)

- ① 読売新聞社、関西大学社会安全学部、メディアランド、防災教材 勇気をもって～災害を知りいのちを守る、2013、180 ページ (川口寿裕は第 7 章 土砂災害、128-141 ページを担当)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

川口 寿裕 (KAWAGUCHI TOSHIHIRO)
 関西大学・社会安全学部・准教授
 研究者番号：80234045